

**Д. М. Анисимов\*, Б. К. Барахтин, Д. С. Созинов, М. Л. Федосеев**

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов  
«Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург

\*mail@crism.ru

## **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ДВУХФАЗНОМ ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Представлены результаты экспериментов с горячей пластической деформацией двухфазного сплава титана в диапазоне температур 600–1100 °С со скоростями сжатия от  $10^{-3}$  до  $10 \text{ с}^{-1}$ . Построена карта процесса для определения эффективности и механизмов рассеяния (диссипации) вводимой механической энергии в условиях горячего пластического сжатия с учетом структурно-фазового превращения. Полученные данные верифицированы методами металлографии и рентгеноструктурного анализа.

*Ключевые слова:* горячая пластическая деформация, титановый двухфазный сплав, структурно-фазовые превращения, механизмы рассеяния.

**D. M. Anisimov, B. K. Barahtin, D. S. Sozinov, M. L. Fedoseev**

## **CHANGES IN A TWO-PHASE TITANIUM ALLOY UNDER HOT PLASTIC DEFORMATION**

The results of experiments with hot plastic deformation of a two-phase titanium alloy in the temperature range of 600–1100 °C with compression rates from  $10^{-3}$  to  $10 \text{ s}^{-1}$  are presented. A process map has been constructed to determine the efficiency and mechanisms of dissipation. The data obtained are verified by the methods of metallography and X-ray diffraction analysis.

*Key words:* hot plastic deformation, titanium two-phase alloy, structural-phase transformations, scattering mechanisms.

**В**определении условий обработки металлов давлением метод имитационного моделирования ключевых операций с построением карт процесса считается одним из перспективных. Метод моделирования с вариацией температур и скоростей пластической деформации и фиксацией диаграмм силового воздействия ( $\sigma(\epsilon)$ ) позволяет в режиме реального времени оценить адекватную реакцию обрабатываемого материала. Для оценки результатов экспериментов с горячей пласти-

ческой деформацией двухфазного сплава титана были проведены исследования на дилатометре, моделирующие процесс ГПД при разных скоростях и температурах (рис. 1), изучены изменения в форме образцов и морфологии внутреннего строения сплава металлографическим методом (рис. 2). Представления реологии и метод эвристической обработки экспериментальных данных, предложенные Прасадом [1], дают возможность построить карту процесса (рис. 3), которая активно используется специалистами и дает приемлемые результаты для различных материалов.

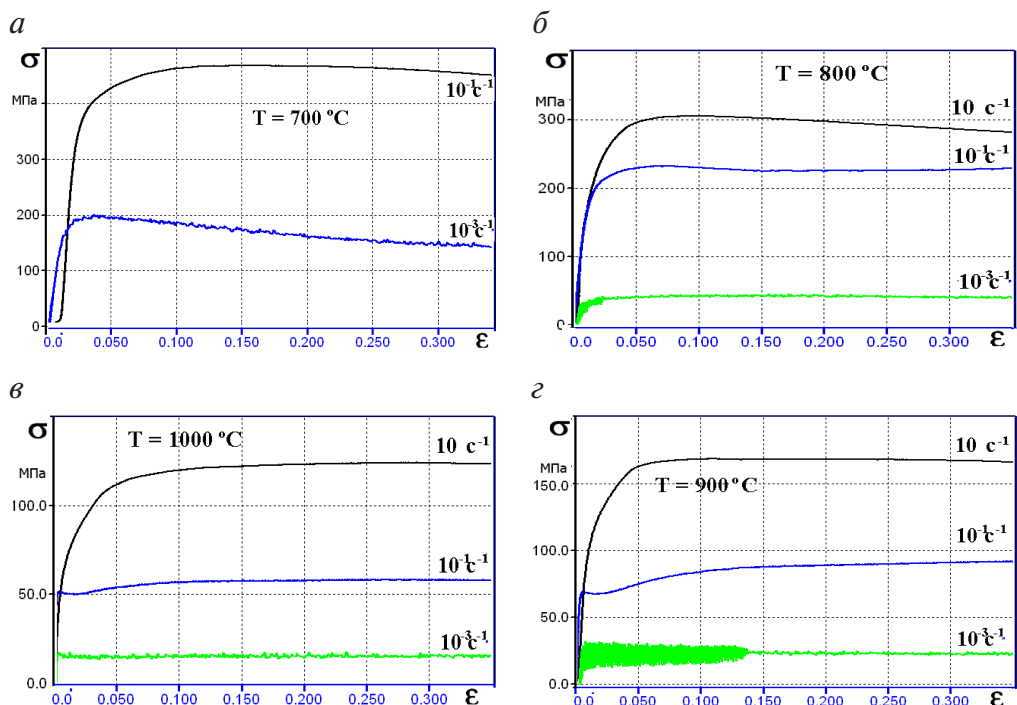


Рис. 1. Примеры диаграмм  $\sigma(\epsilon)$ , полученных при сжатии образцов сплава ВТ23

Систематическими исследованиями поведения металлов и сплавов со структурой ГЦК-решетки установлено [2], что при термопластическом воздействии фазовое состояние металла влияет на процессы рассеяния вводимой механической энергии. Предполагалось, что в актах диссипации механической энергии в процессе ГПД псевдо- $\alpha$  титанового сплава могут участвовать несколько структурных механизмов.

Цель данной работы — оценка поведения двухфазного сплава титана в условиях сжатия в интервале скоростей  $10\text{--}10^{-3} \text{ c}^{-1}$  и температур  $600\text{--}1100^\circ \text{C}$  деформации.

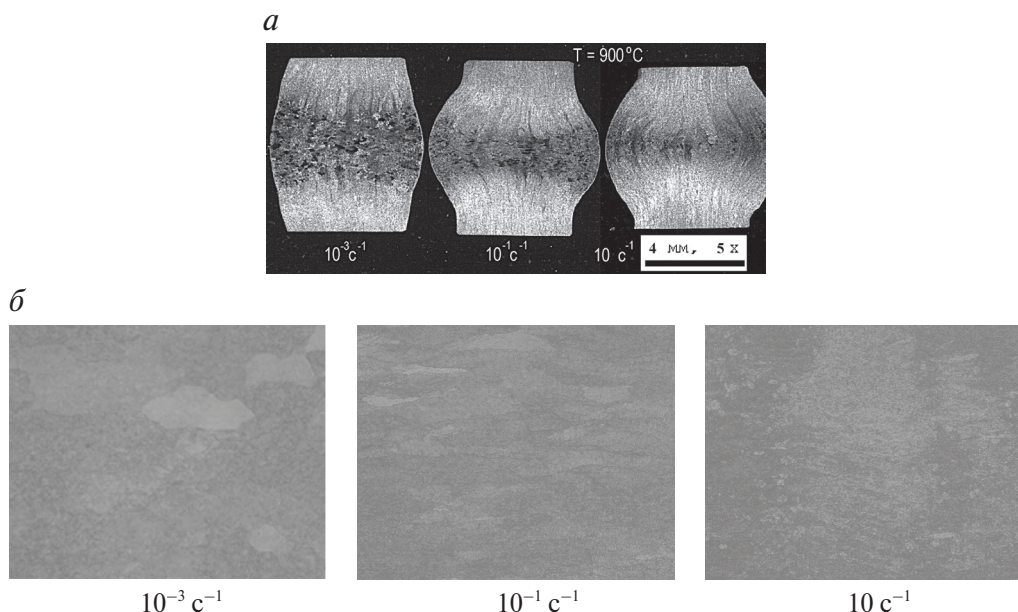


Рис. 2. Изменение формы образцов (*a*) и морфология структуры металла (*б*) после сжатия при 900 °С с указанными скоростями

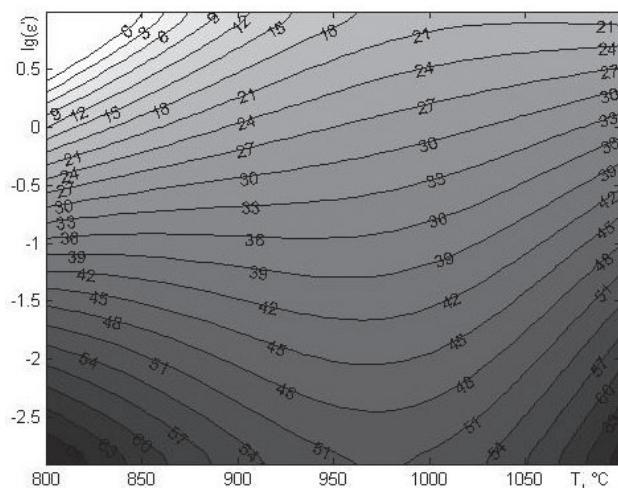


Рис. 3. Карта процесса  $\eta(\lg \epsilon', T)$  по данным горячего сжатия

Акты пластического формоизменения металлов в условиях, приближенных к реальному производству, рассматриваются на основе реологической модели, в которой деформируемый материал представляет собой диссипативную систему. В условиях горячей пластической деформации вводимая механическая энергия рассеивается в форме тепловой энергии, которая и вызывает структурные изменения.

Теория, на основании которой производится построение карт процесса, предполагает анализ рассеяния механической энергии, вводимой «мгновенно» в деформируемое тело. Данные анализа важны при выборе технологических режимов воздействия: усилий, скоростей и температур деформации, поскольку эти параметры определяют не только эффективность обработки заготовки, но и ресурс использованных инструментов (в данном случае прессов). По сути построенные карты представляют результат ответной реакции деформируемого тела на оказанное силовое воздействие в диапазоне скоростей деформации и температур в режиме реального времени без указания конкретных механизмов диссипации механической энергии.

### **Выводы**

1. Рассеяние видимой механической энергии обусловлено работой двух механизмов: аккомодационной упругопластической релаксации в ансамблях дефектов кристаллического строения с эффективностью ~ 25 % и фазового превращения в интервале температур 800–900 °С с эффективностью ~ 15 %.

2. При обработке сплава ВТ23 со скоростью пластической деформации  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$  в интервале температур 800–900 °С сочетание выявленных механизмов диссипации позволяет организовать производительный процесс обработки давлением с сохранением некоторого запаса прочности формируемой детали.

3. Состояние сплава со свойствами, близкими к сверхпластичности, может быть достигнуто в однофазном состоянии ( $T \geq 1050 \text{ °С}$ ) при деформации со скоростью  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и менее.

4. Построение карт процесса целесообразно для нахождения оптимальных режимов горячей обработки металлических материалов.

*Экспериментальные исследования проведены на оборудовании Центра коллективного пользования «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки в рамках соглашения № 14.595.21 0004.*

### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Sasidhara S. Hot Working Guide A Compendium of Processing Maps Edited by Y. V.R. K. Prasad. Bangalore : Department of Metallurgy Indian Institute of Science. 2004. 560 p.
- 2 Рудской А. И., Варгасов Н. И., Барахтин Б. К. Термопластическое деформирование металлов. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 286 с.